



10/518075  
10 Rec'd PCT/PTO 16 DEC 2004

PCT 03/01895

25 JUIN 2003

REC'D 08 SEP 2003

WIPO PCT

# BREVET D'INVENTION

## CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

### COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 11 AVR. 2003

Pour le Directeur général de l'Institut  
national de la propriété industrielle  
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

#### DOCUMENT DE PRIORITÉ

PRÉSENTÉ OU TRANSMIS  
CONFORMÉMENT À LA  
RÈGLE 17.1.a) OU b)

BEST AVAILABLE COPY

INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE

SIEGE  
26 bis, rue de Saint Petersbourg  
75800 PARIS cedex 08  
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04  
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23  
www.inpi.fr



INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE

26bis, rue de Saint-Pétersbourg  
75800 Paris Cedex 08

Téléphone: 01 53.04.53.04 Télécopie: 01.42.94.86.54

## BREVET D'INVENTION

Code de la propriété intellectuelle-livreVI

### REQUÊTE EN DÉLIVRANCE

DATE DE REMISE DES PIÈCES: 19 juin 2002  
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL: 0207599  
DÉPARTEMENT DE DÉPÔT: 75  
DATE DE DÉPÔT:

19 JUIN 2002

Claude JUPIN  
CABINET HARLE ET PHELIP  
7, rue de Madrid  
75008 PARIS  
France

Vos références pour ce dossier: P173FR

#### 1 NATURE DE LA DEMANDE

Demande de brevet

#### 2 TITRE DE L'INVENTION

SUPPORTS ANTI-REFLECHISSANTS ET SUPPORTS AMPLIFICATEURS DE CONTRASTE POUR LA LUMIERE POLARISEE EN REFLEXION

#### 3 DECLARATION DE PRIORITE OU REQUETE DU BENEFICE DE LA DATE DE DEPOT D'UNE DEMANDE ANTERIEURE FRANCAISE

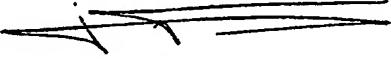
Pays ou organisation      Date      N°

#### 4-1 DEMANDEUR

Nom      CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS)  
Rue      3, rue Michel Ange  
Code postal et ville      75794 PARIS CEDEX 16  
Pays      France  
Nationalité      France  
Forme juridique      Etablissement public

#### 5A MANDATAIRE

Nom      JUPIN  
Prénom      Claude  
Qualité      CPI: b [2000-0193 i]  
Cabinet ou Société      CABINET HARLE ET PHELIP  
Rue      7, rue de Madrid  
Code postal et ville      75008 PARIS  
N° de téléphone      0153046464  
N° de télécopie      0153046400  
Courrier électronique      cabinet@harle.fr

6 DOCUMENTS ET FICHIERS JOINTS		Fichier électronique	Pages	Détails
Description		desc.pdf	33	
Revendications		V	4	9
Dessins			2	2 fig., 1 ex.
Abrégé		V	1	
Figure d'abrégé			1	fig. 2; 1 ex.
Désignation d'inventeurs				
Listage de séquences				
Rapport de recherche				
8 RAPPORT DE RECHERCHE				
Etablissement immédiat				
9 REDEVANCES JOINTES		Devise	Taux	Quantité
062 Dépôt		EURO	35.00	1.00
063 Rapport de recherche (R.R.)		EURO	320.00	1.00
Total à acquitter		EURO		355.00
10 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE				
Signé par		Claude JUPIN		

La loi n°78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique aux fichiers et aux libertés s'applique aux réponses faites à ce formulaire. Elle garantit un droit d'accès et de rectification pour les données vous concernant auprès de l'INPI.

La présente invention concerne des supports porte-objet destinés à améliorer les mesures ou l'observation en réflexion de films minces ou d'objets très petits sous microscope optique ou sous tout autre instrument d'imagerie optique: viseur, lunette, microscope, loupe, loupe binoculaire, caméra, appareil photo, microscope à champ proche, endoscope, microscope confocal, microscope à champ proche optique (SNOM), lecteur de biopuces, lecteur magnéto-optique, microscope confocal. Ces supports sont également destinés à être utilisés dans les techniques de visualisation et de mesure en contraste interférentiel différentiel (DIC).

10 Ces supports sont définis soit par un ensemble de caractéristiques qui peuvent concerner leur nature (exemple: une couche diélectrique sur un substrat de silicium) ou leur fonction (exemple: support amplificateur de contraste pour les observations entre polariseurs croisés), et qui si elles sont communes à un certain nombre de ces supports les classent dans des familles 15 de supports, soit par un ensemble de paramètres ajustables qui permettent de reconnaître individuellement les membres d'une famille donnée.

20 L'objectif de la présente invention est donc de proposer un support, présentant en fonction de l'épaisseur  $e_1$  et de l'indice  $n_1$  de la couche formée sur un substrat d'indice de réfraction complexe  $n_2$ , dans un milieu ambiant d'indice  $n_0$ , soit une fonction amplificatrice de contraste pour un faisceau de lumière polarisée, soit une fonction anti-réfléchissante pour la lumière polarisée.

25 A cet effet, l'invention concerne un support destiné à l'observation entre polariseurs croisés d'un objet placé à son voisinage dans un milieu d'indice  $n_0$  avec un éclairage incohérent convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une longueur d'onde  $\lambda$ , comportant

- un substrat d'indice de réfraction complexe  $n_2$ ,
- une couche d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$ .

30 Selon l'invention,

$$\frac{d^2}{de_1^2} \ln|\sigma|^2 = 0$$

avec

$$\sigma = r_p + r_s = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e(-2j\beta_1) + \sigma_{01}\pi_{12}e(-4j\beta_1)}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)}e(-2j\beta_1))(1 + r_{01(s)}r_{12(s)}e(-2j\beta_1))}$$

formule dans laquelle  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel :

5

$$r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}$$

et

10

$$r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

et  $\beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda}$  avec  $\cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}$ .

15 L'invention concerne également un support destiné à l'observation entre polariseurs croisés d'un objet placé à son voisinage dans un milieu d'indice  $n_0$  avec un éclairage incohérent convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une longueur d'onde  $\lambda$  comportant

- un substrat d'indice de réfraction complexe  $n_2$ ,
- une couche d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$ .

Selon l'invention,

20

$$\frac{d}{de_1} |\sigma^2| = 0$$

avec

$$\sigma = r_p + r_s = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e(-2j\beta_1) + \sigma_{01}\pi_{12}e(-4j\beta_1)}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)}e(-2j\beta_1))(1 + r_{01(s)}r_{12(s)}e(-2j\beta_1))}$$

25

formule dans laquelle  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel :

$$r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}$$

et

$$5 \quad r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

$$\text{et } \beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda} \text{ avec } \cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}.$$

10 L'invention concerne enfin un support destiné à l'observation entre polariseurs croisés d'un objet placé à son voisinage dans un milieu d'indice  $n_0$  avec un éclairage incohérent convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une longueur d'onde  $\lambda$ , comportant

- un substrat d'indice de réfraction complexe  $n_2$ ,
- une couche d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$

15 Selon l'invention,

$$\frac{d}{de_1} \left( \frac{|\sigma|^2}{R_{NP}} \right) = 0$$

avec

$$R_{NP} = \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2 + \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2$$

20 et

$$r(p) = \frac{r_{01(p)} + r_{12(p)} e(-2j\beta_1)}{1 + r_{01(p)} r_{12(p)} e(-2j\beta_1)} \quad \text{et } r(s) = \frac{r_{01(s)} + r_{12(s)} e(-2j\beta_1)}{1 + r_{01(s)} r_{12(s)} e(-2j\beta_1)}$$

et

$$\sigma = r_p + r_s = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01}) e(-2j\beta_1) + \sigma_{01} \pi_{12} e(-4j\beta_1)}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)} e(-2j\beta_1))(1 + r_{01(s)} r_{12(s)} e(-2j\beta_1))}$$

25

formule dans laquelle  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel :

$$r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}$$

et

$$5 \quad r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

et  $\beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda}$  avec  $\cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}$ .

10 Dans différents modes de réalisation, ces inventions concernent également les caractéristiques suivantes qui devront être considérées isolément ou selon toutes leurs combinaisons techniquement possibles :

- l'indice de réfraction  $n_1$  et l'épaisseur  $e_1$  de la couche sont tels que  $\sigma = 0$ ,
- le substrat et la couche sont diélectriques ou faiblement absorbant, les conditions générales de la revendication 4 se réduisant à

15

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = \frac{\lambda}{4} + k \frac{\lambda}{2}$$

avec  $k$  entier, et

$$n_1^2 = \frac{n_2^2 + \sqrt{n_2^2 \cos^2 \theta_0 (n_2^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0)}}{n_2^2 + n_0^2 \cos^2 \theta_0}$$

20 On entend par "faiblement absorbant", le module de la partie imaginaire de l'indice de réfraction  $n_1$  est inférieure à 0.1.

- $\theta_0$  est inférieure à  $2^\circ$ , les conditions générales de la revendication 4 se réduisant à

25

$$\frac{2}{n_1^2} = \frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_2^2}$$

avec  $k$  entier, et

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = \frac{\lambda}{4} + k \frac{\lambda}{2}$$

- le substrat est en cadmium avec  $n_2 = 1.13 - 5.01j$ , la couche ayant pour indice  $n_1 = 1.48$  et  $e_1 = 962 \text{ \AA}$  pour l'air comme milieu ambiant et  $\theta_0 = 30^\circ$ ,

- le substrat et la couche ont les spécificités du tableau suivant dans lequel  $n_1$  et  $e_1$  sont l'indice et l'épaisseur de la couche,  $n_2$  l'indice de réfraction complexe du substrat, pour l'air comme milieu ambiant et  $\theta_0 = 0,2^\circ$

substrat	$n_2$	$n_1$	$e_1(\text{\AA})$
or	$0.47 - 2.83j$	1.65	800
argent	$0.2 - 3.44j$	1.60	850
aluminium	$1.44 + 5.23j$	1.50	953
nickel	$1.58 - 3.42j$	1.52	920

-  $\theta_0$  est un angle d'incidence moyen valant  $20^\circ$  et le substrat et la couche ont les spécificités du tableau suivant dans lequel  $n_1$  et  $e_1$  sont l'indice et l'épaisseur de la couche,  $n_2$  l'indice de réfraction complexe du substrat, pour l'air comme milieu ambiant,

10

substrat	$n_2$	$n_1$	$e_1 (\text{\AA})$
or	$0.47 - 2.83j$	1.58	870
argent	$0.2 - 3.44j$	1.53	930
aluminium	$1.44 + 5.23j$	1.44	1 040
nickel	$1.58 - 3.42j$	1.46	1 000

Dans différents modes de réalisation possibles, l'invention sera décrite plus en détail en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 est une représentation schématique de la transmission et de la réflexion obliques d'une onde plane à l'interface plan entre deux milieux semi-infinis 0 et 1;

- la figure 2 est une représentation schématique d'un support, selon l'invention;

20 Pour décrire complètement l'invention, le support qu'elle concerne est présenté, ci-après, dans son contexte en reprenant à la fois les définitions des éléments impliqués et des dispositifs proches par rapport auxquels il est utile de le situer.

### I. Conventions:

Les conventions de signe adoptées sont celles représentées à la figure 1 et décrites également dans le livre de Azzam et Bashara intitulé "ellipsometry and polarised light", North-Holland, p 271.

5 Cette figure représente la transmission et la réflexion obliques d'une onde plane à l'interface plan entre deux milieux semi-infinis 0 et 1.  $\theta_0$  et  $\theta_1$  sont respectivement les angles d'incidence et de réfraction.  $p$  et  $s$  sont respectivement les polarisations parallèle et perpendiculaire au plan d'incidence. Le vecteur produit  $\hat{p} \times \hat{s}$  des vecteurs unités le long de ces axes  
10 est parallèle à la direction de propagation.

### II. Définitions:

- Par "support", on entend l'association d'un substrat 1 d'indice complexe de réfraction  $n_2$  qui est la surface d'un solide et d'un revêtement d'épaisseur  $e_1$  et d'indice de  $n_1$  comportant au moins une couche 2. Ce support est placé dans un milieu ambiant 3 d'indice  $n_0$ .  
15
- Par "échantillon", on entend l'association du support porte-objet et de l'objet qu'il porte, ledit support étant l'objet de l'invention.
- Par "observation", on entend une observation oculaire directe à travers un instrument ou l'acquisition d'une image ou d'un signal par des moyens de  
20 détection comprenant un dispositif d'enregistrement tel qu'appareil photo analogique ou numérique, caméra CCD, ou un dispositif de mesure tel qu'un détecteur (cellule photovoltaïque, photomultiplicateur) ou une matrice de détecteurs (barrette de photodiodes, CCD, ...) placés dans un plan où se forme l'image de l'échantillon.
- 25 • Un support parfaitement réfléchissant est défini par les relations

$$|r_p| = |r_s| = 1 \quad (E1)$$

sur ses coefficients de Fresnel  $r_p$  et  $r_s$ .

- "L'intensité normalisée" d'une image obtenue au moyen d'un support sur des moyens de détection ou d'observation est définie par le rapport  $R = \frac{I}{I_0}$  où  $I =$   
30  $I(x, y)$  désigne l'intensité recueillie en un point  $(x, y)$  de l'image et où  $I_0 = I_0(x, y)$  désigne l'intensité recueillie en un point  $(x, y)$  de l'image par les mêmes moyens de détection ou d'observation réglés de la même façon en l'absence de tout polariseur et en utilisant un support parfaitement réfléchissant.

- Un support "anti-réfléchissant" (AR) est défini comme ayant un coefficient de réflexion minimal pour l'ensemble de ses paramètres ajustables. Il est relatif aux conditions de l'observation ou de la mesure. Un support anti-réfléchissant idéal est tel que son coefficient de réflexion soit nul.

5     • Un support "amplificateur de contraste" est défini tel que l'objet qu'il porte soit observé avec un contraste rendu maximal ou qu'une grandeur physique de l'objet soit mesurée avec une sensibilité rendue maximale sur l'ensemble de ses paramètres ajustables. Il est également relatif aux conditions de l'observation ou de la mesure. Il est de plus relatif à la nature de l'objet

10    10   Lorsque la nature de l'objet n'est pas précisée, l'objet sera défini par défaut comme un film mince d'épaisseur 1 *Angström* (Å) et d'indice n identique à celui de la surface du support, c'est à dire du matériau en contact avec l'objet. Dans le cas d'un support recouvert d'un empilement de couches 2 par exemple, l'indice de l'objet sera égal à celui de la couche 2 externe de l'empilement.

15    15

### III. Conditions d'éclairage:

20    "L'éclairage axial convergent" est convergent et à symétrie radiale autour de la normale à la surface, défini comme "l'axe" dans la suite de la description, avec un angle d'ouverture  $\theta_{max}$ . Les angles d'incidence participant au cône d'éclairage sont donc tous les angles compris entre 0 et  $\theta_{max}$ .

25    "L'éclairage annulaire possède aussi une symétrie radiale autour de la normale à la surface, i.e. l'axe, mais est défini par un angle d'incidence  $\theta$  qui est unique. L'éclairage "anisotrope" est défini par le fait que la symétrie radiale des azimuts  $\varphi$  est brisée mais la symétrie par rapport à l'axe conservée, et enfin "l'éclairage oblique" est défini par un seul angle d'incidence  $\theta$  et un seul azimut  $\varphi$ .

30    Excepté lorsque spécifié, l'éclairage sera considéré comme annulaire dans le reste de la description. On appelle "angle moyen"  $\theta_0$  l'angle défini par le cercle séparant le cône d'éclairage en deux angles solides de même valeur. Le support est donc destiné à être utilisé sous un éclairage convergent d'ouverture angulaire  $\Delta\theta_0$ ,  $\theta_0$  est l'angle d'incidence moyen compris entre 0 et  $\Delta\theta_0$  et est défini par la relation  $\cos\theta_0 = \cos^2\left(\frac{\Delta\theta_0}{2}\right)$  (Figure 2).

Par défaut, la collection de la lumière par les moyens de détection ou d'observation est supposée à symétrie radiale autour de la normale à la surface, avec le même angle d'ouverture, dans le reste de la description.

L'éclairage est considéré comme spatialement incohérent, ce qui signifie qu'un

5 faisceau lumineux permettant l'éclairage ne peut interférer qu'avec lui-même. Dans ces conditions, les contributions à la formation de l'image doivent être ajoutées en amplitude le long d'un faisceau et en intensité sur l'ensemble des faisceaux, c'est à dire sur l'ensemble des angles d'incidence  $\theta$  et des azimuts  $\phi$  contribuant à l'éclairage. Les coefficients de Fresnel  $r_p$  et  $r_s$  sont des fonctions  
10 complexes de  $\theta$ . Dans le cas de supports anisotropes, ce sont de plus des fonctions de  $\phi$ . Mais le support est supposé isotrope dans le reste de la description excepté lorsque spécifié.

De même, l'éclairage est supposé quasi-monochromatique, le faisceau lumineux étant centré sur une longueur d'onde  $\lambda$ .

15 **IV. Conditions de polarisation**

**IV.1) Lumière non polarisée:**

L'intensité normalisée  $R_{NP}$  s'écrit:

$$R_{NP} = \frac{1}{2} (|r_p|^2 + |r_s|^2) \quad (E2)$$

Elle vaut 1 pour un support parfaitement réfléchissant.

20 Le coefficient de réflexion du support est défini par cette intensité normalisée en lumière non polarisée. Il dépend des conditions d'éclairage.

**IV.2) Lumière polarisée:**

L'échantillon est placé entre un premier et un deuxième polariseurs. Dans un mode de réalisation préférentielle et pour le reste de la description 25 lesdits polariseurs seront considérés comme linéaires. Lorsque ledit échantillon est éclairé par un faisceau lumineux, le faisceau traverse sur son trajet optique le premier polariseur qui définit sa polarisation, puis après interaction avec l'échantillon, le faisceau lumineux traverse le deuxième polariseur. Le premier polariseur est appelé "polariseur d'éclairage". Le deuxième polariseur est le polariseur d'analyse ou "analyseur". Le premier et le deuxième polariseurs forment entre eux un angle  $\phi$  modulo  $\pi$ .

30 L'intensité normalisée  $R(\phi)$  s'écrit:

$$4 R(\phi) = \cos^2 \phi (|r_p|^2 + |r_s|^2) - \frac{\cos 2\phi}{4} |r_p + r_s|^2 \quad (E3)$$

ou, de façon équivalente:

$$4 R(\phi) = \frac{1}{2} (|r_p|^2 + |r_s|^2) + \frac{\cos 2\phi}{4} |r_p - r_s|^2 = R_{NP} + \frac{\cos 2\phi}{4} |r_p - r_s|^2 \quad (E4)$$

5 Dans le cas particulier où le premier et deuxième polariseurs sont parallèles, elle s'écrit:

$$4 R(0) = (|r_p|^2 + |r_s|^2) - \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2 = 2R_{NP} - \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2 \quad (E5)$$

ou, de façon équivalente:

$$4 R(0) = \frac{1}{2} (|r_p|^2 + |r_s|^2) + \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2 = R_{NP} + \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2 \quad (E6)$$

10

Dans le cas particulier où les premier et deuxième polariseurs sont perpendiculaires, c'est à dire croisés, elle s'écrit:

$$4 R(\frac{\pi}{2}) = \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2 \quad (E7)$$

15 ou, de façon équivalente:

$$4 R(\frac{\pi}{2}) = \frac{1}{2} (|r_p|^2 + |r_s|^2) - \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2 = R_{NP} - \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2 \quad (E8)$$

Dans le cas particulier où les deux polariseurs font entre eux un angle  $\frac{\pi}{4}$ , elle s'écrit:

$$20 \quad 4 R(\frac{\pi}{4}) = \frac{1}{2} (|r_p|^2 + |r_s|^2) = R_{NP} \quad (E9)$$

Ainsi, l'intensité normalisée peut être modulée autour de sa valeur moyenne  $R_{NP}/4$  avec une amplitude  $\frac{1}{16} |r_p - r_s|^2$  par rotation relative de l'analyseur et du polariseur d'éclairage.

25 Si on pose  $R^+ \equiv \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2$  et  $R^- \equiv \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2$ .

Alors:

$$4R(\phi) = 2R_{NP}\cos 2\phi - R^+\cos 2\phi = R_{NP} + R^-\cos 2\phi = R^+ + 2R^-\cos 2\phi \quad (E3-E4 \text{ bis})$$

$$4R(0) = 2R_{NP} - R^+ = R_{NP} + R^- \quad (E5-E6 \text{ bis})$$

30

$$4 R\left(\frac{\pi}{2}\right) = R^+ = R_{NP} - R^- \quad (\text{E7-E8 bis})$$

Le support de l'invention est destiné à être utilisé entre un premier et un deuxième polariseurs croisés. Le faisceau lumineux incident sur le support est  
5 polarisé.

## V. Supports et revêtements anti-réfléchissants

### V.1) lumière non polarisée.

Il est connu qu'en lumière non polarisée, un support anti-réfléchissant  
10 (AR) placé dans un milieu ambiant d'indice  $n_0$  présente un coefficient  $R_{NP}$  qui est minimum. Le support anti-réfléchissant idéal, qui vérifie  $R_{NP} = 0$  ne peut être obtenu que pour un seul angle d'incidence  $\theta_0 = 0$  et ne peut être réalisé sur un substrat 1 d'indice  $n_2$  différent de  $n_0$  où  $n_2$  est l'indice de réfraction complexe du substrat 1, qu'en déposant une seule couche 2 d'épaisseur  
15 optique  $\frac{\lambda}{4}$  et d'indice optique  $n_1$  tel que:

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (\text{E10})$$

$n_0$  étant l'indice optique du milieu incident.

L'épaisseur optique  $\frac{\lambda}{4}$  signifie que l'épaisseur physique  $e_1$  de la couche 2  
20 est liée à la longueur d'onde  $\lambda$  du faisceau lumineux permettant l'éclairage et à la direction  $\theta_1$  dudit faisceau par rapport à la normale à la surface après réfraction dans la couche 2, ou angle d'incidence réfracté, par la relation:

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = \frac{\lambda}{4} + k \frac{\lambda}{2} \quad (\text{E11})$$

25 avec  $k$  entier et  $\cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}$ .

Dans le cas considéré, cette relation se réduit donc à:

$$n_1 e_1 = \frac{\lambda}{4} + k \frac{\lambda}{2} \quad (\text{E11 bis})$$

Rappelons que l'angle réfracté  $\theta_1$  est lié à l'angle incident  $\theta_0$  sur le support par  
30 la relation de Snell:  $n_1 \sin \theta_1 = n_0 \sin \theta_0$  où  $n_0$  est l'indice optique du milieu

incident. De même, nous avons  $n_2 \sin \theta_2 = n_0 \sin \theta_0$ . Rappelons enfin que  $\sin^2 \theta_i + \cos^2 \theta_i = 1$  dans tous les milieux.

Le support antiréfléchissant idéal ne peut donc exister que pour un nombre fini d'angles d'incidences. Réciproquement, un support anti-5 réfléchissant pour une longueur d'onde  $\lambda$  et un angle d'incidence  $\theta_0$  donnés ne peut être idéal à cette incidence que pour un nombre fini de longueurs d'ondes particulières.

En pratique, il est souvent préférable d'utiliser des supports AR non 10 idéaux mais peu sensibles à la longueur d'onde  $\lambda$  ou à l'angle d'incidence  $\theta_0$  du faisceau lumineux incident. Ces supports sont obtenus par des empilements multicouches appelés traitements anti-reflets. Dans un mode de réalisation, ces traitements sont utilisés pour éliminer les reflets sur les verres de lunettes ou pour éliminer la lumière parasite générée par les réflexions sur les dioptres des systèmes optiques.

15 Il existe cependant d'autres cas où les supports AR plus sélectifs et plus efficaces sont recherchés, par exemple pour l'élaboration de filtres interférentiels passe-bande étroits en transmission.

## V.2) supports et revêtements "AR-Pol" en lumière polarisée.

20 L'invention concerne des supports similaires aux supports anti-réfléchissants, mais destinés à être utilisés en lumière polarisée. Ils se différencient des supports anti-réfléchissants. Nous les désignons par l'appellation "AR-Pol".

25 Ces nouveaux supports forment un ensemble encore plus vaste et plus diversifié que les supports anti-réfléchissants classiques, et peuvent intervenir comme accessoires ou comme composants dans de nombreux procédés ou dispositifs. Cet ensemble est le premier objet de la présente invention. Il se subdivise en familles correspondant à des regroupements par nature ou par fonction dont nous donnons ici quelques exemples. Chaque famille est 30 désignée par une appellation "AR-( )-Pol-( )-( )...", où les parenthèses successives représentent les précisions supplémentaires permettant de la définir.

Des équations E2 à E9 découlent les relations d'ordre suivantes:

$$R\left(\frac{\pi}{2}\right) \leq R(\phi) \quad (I1)$$

pour tout  $\phi$ , et:

$$4 R\left(\frac{\pi}{2}\right) \leq 4 R\left(\frac{\pi}{4}\right) = R_{NP} \leq 4 R(0) \quad (I2)$$

Ainsi que le montre l'inégalité I1, l'intensité normalisée de l'image d'un support ou d'un échantillon isotrope est toujours plus faible entre deux polariseurs croisés que pour toute autre orientation relative des polariseurs et qu'en l'absence de polariseur.

### V.3) Microscope polarisant:

Comme il est bien connu, le coefficient d'extinction  $C_e$  d'un microscope polarisant, est l'une de ses caractéristiques techniques importantes. Il doit être aussi faible que possible. Dans le cas d'un microscope fonctionnant en réflexion, il est défini comme le rapport des intensités réfléchies d'une part, pour un support parfaitement réfléchissant placé entre un premier et un deuxième polariseurs croisés et d'autre part, entre un premier et un deuxième polariseurs parallèles, soit:

$$C_e = \frac{I\left(\frac{\pi}{2}\right)}{I(0)} \quad (E14)$$

L'examen des équations E5 et E7 montre que la définition du support parfaitement réfléchissant donnée par les équations E1 n'est pas suffisante car l'intensité recueillie  $I(\phi)$  dépend des phases relatives des deux coefficients de Fresnel  $r_p$  et  $r_s$  à travers leur somme. Comme le but du coefficient d'extinction est de caractériser le microscope lui-même, il est nécessaire d'introduire davantage de précision dans la définition du support parfaitement réfléchissant en considérant soit la condition virtuelle  $r_p = r_s = 1$ , soit la condition  $r_p = -r_s = 1$ . La première condition n'étant pas physiquement réaliste, elle est donc éliminée pour ne retenir que la seconde. De plus, on a toujours  $r_p = -r_s$  pour un angle d'incidence du faisceau lumineux sur le support tel que  $\theta_0 = 0$ , ce qui permet d'associer le coefficient  $C_e = 0$  au microscope idéal.

Nous définissons le *Coefficient d'extinction utile* de l'ensemble formé par le microscope et l'échantillon comme le rapport:

$$C_u = \frac{I\left(\frac{\pi}{2}\right)}{I(0)} \quad (E15)$$

l'échantillon étant au minimum constitué d'un support.

Pour un microscope polarisant fonctionnant en réflexion, la valeur de  $C_u$  découle directement des équations E6 et E8:

$$C_u = \frac{\frac{R_{NP} - 1}{4} |r_p - r_s|^2}{R_{NP} + \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2} = \frac{R_{NP} - R^-}{R_{NP} + R^+} \quad (\text{E16})$$

5 qui s'écrit encore:

$$C_u = \frac{\frac{1}{4} |r_p + r_s|^2}{2R_{NP} - \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2} = \frac{R^+}{R_{NP} - R^+} \quad (\text{E16 bis}),$$

puisque:

$$R_{NP} = \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2 + \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2 = R^+ + R^- \quad (\text{E16 ter})$$

10 Maximisation du coefficient d'extinction:

Le support anti-réfléchissant idéal correspond à  $R_{NP} = 0$ . D'après l'équation E2, cela implique à la fois  $r_p = 0$  et  $r_s = 0$ , et donc  $R(\phi) = 0$  quel que soit  $\phi$ . Le coefficient d'extinction utile n'est plus défini. On peut alors par prolongement le définir comme:

15  $C_u = \lim_{R_{NP} \rightarrow 0} C_u \quad (\text{E17}),$

ce qui permet d'englober le cas limite du support anti-réfléchissant idéal dans la discussion qui suit.

20 D'après l'équation E16 bis, le coefficient d'extinction utile  $C_u$  est une fonction croissante du rapport  $\frac{|r_p + r_s|^2}{R_{NP}}$ . Pour améliorer le coefficient d'extinction, et donc l'abaisser, c'est ce rapport qu'il faut minimiser.

## VI. supports anti-réfléchissants entre polariseurs croisés AR-X-Pol

25 Nous définissons la famille des supports AR-X-Pol comme la famille des supports pour lesquels le rapport  $\frac{|r_p + r_s|^2}{R_{NP}}$  est rendu minimal, ce qui représente une règle de conception dudit support. De façon équivalente, nous en donnons la définition fonctionnelle suivante: c'est la famille des supports qui optimisent

le coefficient d'extinction utile de l'ensemble [microscope + support] pour un microscope polarisant idéal.

Les supports AR-X-Pol idéaux s'obtiennent lorsque ce minimum est nul. Ils sont donc donnés par la condition  $\sigma = 0$ .

5 Nous définissons le revêtement AR-X-Pol comme la couche 2 ou l'empilement de couches qui permet de transformer une substrat 1 donné en un support AR-X-Pol.

#### VI.1) supports AR-Pol-X-SD-1D

10 L'expression de  $r_p$  et  $r_s$  pour un solide d'indice optique  $n_2$  recouvert d'une seule couche 2 d'indice  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$  dans un milieu ambiant d'indice  $n_0$  est classiquement donnée par :

$$r(m) = \frac{r_{01(m)} + r_{12(m)}e(-2j\beta_1)}{1 + r_{01(m)}r_{12(m)}e(-2j\beta_1)} \quad (\text{E17})$$

[ Azzam et Bashara, "ellipsometry and polarised light", North-Holland, 1987], avec: soit  $m = s$ , soit  $m = p$ , selon la polarisation considérée et avec:

15

$$\beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda} \quad (\text{E18})$$

$$\text{. où } \cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left( \frac{n_0}{n_1} \right)^2 \sin^2 \theta_0}.$$

Cette équation nous permet d'écrire :

20

$$\sigma = r_p + r_s = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e(-2j\beta_1) + \sigma_{01}\pi_{12}e(-4j\beta_1)}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)}e(-2j\beta_1))(1 + r_{01(s)}r_{12(s)}e(-2j\beta_1))} \quad (\text{E19})$$

où  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel:

25

$$r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j} \quad (\text{E20})$$

et

$$r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j} \quad (E21)$$

### VI.1-1) Les supports AR- X-Pol- SD-1D idéaux

Ces supports sont obtenus lorsque  $\sigma = 0$  (E19 bis)

5 Contrairement à la condition  $[R_{NP} = 0]$  qui définit les supports antiréfléchissants classiques idéaux, la condition  $\sigma = 0$  est toujours vérifiée en incidence normale. Les cas dans lesquels cette condition est également vérifiée pour un angle d'incidence non nul seront examinés ci-dessous.

10 Les matériaux considérés étant diélectriques ou quasi-diélectriques,  $r_{ij(p)}$  et  $r_{ij(s)}$  sont réels, et donc  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  sont réels. La situation recherchée correspond donc au cas où  $e^{-2j\beta_1}$  est réel, ce qui entraîne, soit :

$$2\beta_1 = (2k + 1)\pi \quad (E22)$$

soit:

15  $2\beta_1 = 2k\pi \quad (E23)$

avec  $k$  entier, c'est à dire soit:

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = \frac{1}{4} + k \frac{\lambda}{2} \quad (E24)$$

20

soit:

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = k \frac{\lambda}{2} \quad (E25)$$

25 La condition E24 est identique à la condition E11 qui est l'une des relations définissant les supports anti-réfléchissants classiques. On a donc  $e^{-2j\beta_1} = \pm 1$ . La recherche des solutions se réduit à celle des équations:

$$\sigma_{01}(1 + \pi_{12}) - \sigma_{12}(1 + \pi_{01}) = 0 \quad (E26)$$

30

et:

$$\sigma_{01}(1 + \pi_{12}) + \sigma_{12}(1 + \pi_{01}) = 0 \quad (\text{E27})$$

On note  $c_k^2 = \cos^2 \theta_k$  et  $s_k^2 = \sin^2 \theta_k$  pour tous les milieux.

5 Rappelons la relation de Snell:  $n_k \sin \theta_k = n_0 \sin \theta_0$   
Il est facile d'établir:

$$\sigma_{ij} = \frac{2n_i n_j (c_i^2 - c_j^2)}{n_i n_j (c_i^2 + c_j^2) + c_i c_j (n_i^2 + n_j^2)} \quad (\text{E28})$$

et:

$$10 \quad 1 + \pi_{ij} = \frac{2n_i n_j (c_i^2 + c_j^2)}{n_i n_j (c_i^2 + c_j^2) + c_i c_j (n_i^2 + n_j^2)} \quad (\text{E29})$$

d'où:

$$\frac{\sigma_{ij}}{1 + \pi_{ij}} = \frac{(c_i^2 - c_j^2)}{(c_i^2 + c_j^2)} \quad (\text{E30})$$

L'équation E26 se réduit ainsi à:

$$15 \quad c_0 c_2 = c_1^2 \quad (\text{E31})$$

qui s'écrit encore:

$$2n_0^2 n_2^2 - n_1^2 (n_0^2 + n_2^2) = (n_0^2 n_2^2 - n_1^4) \sin^2 \theta_1 \quad (\text{E32})$$

Cette équation peut être résolue sans difficulté par rapport à chacun de ses paramètres.

Elle n'est jamais satisfaite avec un support anti-réfléchissant classique.

20 Dans le cas où l'angle d'incidence est très petit, cette condition se réduit à:

$$\frac{2}{n_1^2} = \frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_2^2} \quad (\text{E33})$$

Le couple d'équations E25 et E27 n'a pas de solution pour  $n_0 \neq n_2$ .

25 Les deux formules E24 et E32 (ou de façon équivalente E35 bis) définissent la famille de supports AR-X-Pol -SD-1D idéaux pour un angle d'incidence arbitraire ou pour un éclairage axial convergent défini par un angle réfracté moyen  $\langle \theta_1 \rangle$ .

Les deux formules E24 et E33 définissent la sous-famille de supports AR-X-Pol -SD-1D idéaux pour un instrument d'optique avec un éclairage annulaire ou avec une ouverture faible du faisceau d'éclairage autour de la normale et définie par un angle réfracté moyen  $\langle \theta_1 \rangle$ .

**Propriétés des équations E32 et E33 et conséquences:**

Les 4 variables  $n_0$ ,  $n_2$ ,  $n_1$  et  $\sin \theta_1 = \frac{n_1}{n_0} \sin \theta_0$  ne sont pas indépendantes.

Il suffit de considérer les variables  $x = \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^2$  et  $y = \left(\frac{n_2}{n_0}\right)^2$  pour décrire toutes les situations.

5. L'équation E32 devient alors:

$$x^2(y + c_0^2) - 2xy + ys_0^2 = 0 \quad (\text{E34})$$

dont les solutions sont données par

i) les solutions en  $x$ :

$$10 \quad x = \frac{y + c_0 \sqrt{y(y - s_0^2)}}{y + c_0^2} \quad (\text{E35})$$

qu'on peut aussi écrire:

$$n_1^2 = \frac{n_2^2 + \sqrt{n_2^2 \cos^2 \theta_0 (n_2^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0)}}{n_2^2 + n_0^2 \cos^2 \theta_0} \quad (\text{E35bis})$$

ii) les solutions en  $y$ :

$$15 \quad y = \frac{c_0^2 x^2}{c_0^2 - (x - 1)^2} \quad (\text{E36})$$

iii) les solutions en  $\theta_0$ :

$$c_0^2 = \frac{y(x-1)^2}{y - x^2} = \frac{n_2^2 (n_1^2 - n_0^2)^2}{n_0^2 (n_0^2 n_2^2 - n_1^4)} \quad (\text{E37})$$

iv) la variation de  $x$  avec l'angle d'incidence  $\theta_0$ :

$$\frac{dx}{d\theta_0} = -\sin 2\theta_0 \frac{2y(x-1)(y-x)}{(y-x^2)^2} = -\sin 2\theta_0 \frac{2n_0^2 n_2^2 (n_1^2 - n_0^2)(n_2^2 - n_0^2)}{(n_0^2 n_2^2 - n_1^4)^2} \quad (\text{E38})$$

20 qui montre que l'indice optimal décroît quand l'angle d'incidence augmente.

La courbe ci-dessous montre l'évolution de  $x$  avec  $\theta_0$ .

Pour des incidences faibles, elle est décrite par l'approximation:

$$x \approx \frac{2y}{(1+y)} \left( 1 - \frac{(y-1)^2}{4y(y+1)} \theta_0^2 \right) = \frac{2n_2^2}{(n_0^2 + n_2^2)} \quad (\text{E39})$$

soit:

$$n_1^2 \approx \frac{2n_0^2 n_2^2}{(n_0^2 + n_2^2)} - n_0^2 \left( \frac{n_2^2 - n_0^2}{n_2^2 + n_0^2} \right)^2 \frac{\theta_0^2}{2} \quad (\text{E40})$$

qui montre à nouveau que l'indice optimal décroît quand l'angle d'incidence augmente.

Cette dépendance est d'autant plus faible que y est proche de 1.

5 Or, pour un microscope parfait ( $C_e = 0$ ), le coefficient d'extinction utile est toujours nul en incidence normale ( $C_u = 0$ ).

10 Un support AR-X-POL optimisé pour un angle non nul, par exemple de l'ordre de 20 degrés, est optimal pour travailler avec un éclairage annulaire correspondant. Mais de plus, puisqu'il permet d'obtenir  $C_u = 0$  à la fois pour une incidence nulle et pour une incidence non nulle, il permet de conserver un excellent coefficient d'extinction utile sur l'ensemble du cône d'ouverture d'un éclairage axial convergent, de 0 à 30 degrés par exemple. Cela constitue un avantage considérable des revêtements AR-X-POL sur les revêtements anti-réfléchissants classiques pour toutes les applications des supports anti-réfléchissants compatibles avec l'utilisation d'une lumière polarisée.

15 Cette flexibilité sur l'angle d'incidence se traduit par une flexibilité analogue sur la longueur d'onde de l'éclairage à faible incidence. En effet, par différenciation de l'équation E24 par exemple, nous obtenons:

$$- \tan(\theta_1) \Delta \theta_1 n_1^2 = \frac{\Delta \lambda (2k+1)}{\lambda}$$

20 qui montre qu'une variation de longueur d'onde aussi grande que 30% avec un éclairage annulaire est équivalente à un éclairage convergent avec une ouverture de 30 degrés à longueur d'onde fixe. Cette variation couvre l'ensemble du spectre visible. On peut encore agrandir la plage de longueurs d'onde utilisée en travaillant sur les ordres supérieurs ( $k \neq 0$ ).

25 Si l'on veut au contraire exploiter les effets de couleur à des fins de détection, l'utilisation d'un éclairage annulaire avec un angle d'incidence élevé permet d'apporter une grande sensibilité à la longueur d'onde.

Les supports et revêtements AR-X-Pol sont donc particulièrement avantageux pour des utilisations en lumière blanche.

30 L'indice  $n_1$  de la couche 2 est intermédiaire entre l'indice  $n_2$  du substrat 1 sur lequel elle est formée et l'indice  $n_0$  du milieu ambiant. Les équations E32 et E33 sont symétriques en  $n_0$  et  $n_2$ .

Cela montre que ladite couche 2 possède les mêmes propriétés que la lumière se réfléchisse du milieu de faible indice vers le milieu de fort indice ou du milieu de fort indice vers le milieu de faible indice.

5 Ainsi, on peut éteindre la réflexion d'une lumière polarisée lorsque le substrat 1 est l'extrémité d'une fibre optique, ou bien une lame ou le fond d'une boîte de Petri lorsqu'on l'observe par en-dessous sur un microscope inversé.

#### VI.1-2) supports AR-Pol-X-SD-1D approchés

Lorsque les trois indices ( $n_0$ ,  $n_1$  et  $n_2$ ) sont imposés ou contraints, le minimum de  $|\sigma|$  par rapport à  $e_1$  n'est plus nul si la condition E32 ne se trouve 10 pas vérifiée, mais ce minimum existe néanmoins et correspond à la meilleure extinction possible compte tenu des contraintes.

La meilleure extinction possible entre polariseurs croisés s'obtient alors en recherchant le minimum de  $|\sigma|$  (ou de façon équivalente celui de  $|\sigma|^2$ ) par rapport à  $e_1$ . Avec  $\theta_1$  et  $n_1$  fixés, cela revient à les chercher par rapport à  $\beta_1$ .

15 Posons  $z = e^{-2j\beta_1} = \cos 2\beta_1 - j\sin 2\beta_1$ . L'expression de  $\sigma$  donnée par l'équation E19 est le rapport de 2 polynômes de degré 2 en  $z$ . Puisque  $|z| = 1$ , le carré du module de chacun de ces polynômes ne contient que des termes constants, des termes en  $\cos 2\beta_1$ , et des termes en  $\cos 4\beta_1$ . La dérivée de leur rapport est donc proportionnelle à  $\sin 2\beta_1$ . Les solutions de  $\sin 2\beta_1 = 0$  sont donc des

20 solutions de l'équation  $\frac{d|\sigma|^2}{d\beta_1} = 0$ . On retrouve donc les solutions données par les équations E24 et E25. Ainsi, même lorsque les conditions E32 ou E33 ne sont pas satisfaites, on peut optimiser l'épaisseur de la couche 2 pour optimiser le coefficient d'extinction utile sous un microscope polarisant, et cet optimum correspond soit à une couche 2 "à  $\frac{\lambda}{4}$ ", soit à une couche 2 "à  $\frac{\lambda}{2}$ ".

#### 25 VI.2) supports AR-X-Pol-1

Nous décrivons ici les règles de construction des supports AR-X-Pol constitués d'un substrat 1 solide recouvert d'une seule couche 2 dans le cas général où le support, la couche 2, et le milieu incident 3 ont des indices optiques complexes quelconques (milieux éventuellement absorbants).

30

#### VI.2-1) supports AR-X-Pol-1 idéaux

Parmi ceux-ci, les supports idéaux pour l'angle  $\theta_0$  sont obtenus lorsque  $\sigma = 0$ , où la quantité  $\sigma$  est donnée par l'équation E19, où  $\beta_1$  est lié à l'angle  $\theta_1$  par la relation E18,  $\theta_2$ ,  $\theta_1$  et  $\theta_0$  étant toujours liés par la relation de Snell étendue aux fonctions complexes.

5 L'équation:

$$\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})z + \sigma_{01}\pi_{12}z^2 = 0 \quad (\text{E19 ter})$$

a toujours 2 solutions  $z_1$  et  $z_2$  qui s'expriment en fonction des coefficients  $\sigma_{01}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\pi_{01}$  et  $\pi_{12}$  eux mêmes fonctions des trois indices  $n_0$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  et de l'angle  $\theta_0$ . On note  $z_1$  la solution de plus petit module.

10 Le support idéal pour l'angle  $\theta_0$  est obtenu lorsque

$$|z_1(\sigma_{01}, \sigma_{12}, \pi_{01}, \pi_{12})| = 1 \quad (\text{E41})$$

Cette relation entre les coefficients  $\sigma_{01}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\pi_{01}$  et  $\pi_{12}$  qui sont eux-mêmes des fonctions explicites de  $\theta_0$ ,  $n_0$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  peut être résolue numériquement par rapport à n'importe laquelle de ces variables afin d'obtenir

15 un support ou un revêtement AR-X-POL idéal.

La relation E41 est une généralisation de l'équation E26.

L'épaisseur  $e_1$  optimale, toujours liée à  $\beta_1$  par l'équation E18, est donnée par:

$$\beta_1 = -\frac{1}{2} \operatorname{Arg}(z_1) \quad (\text{E42})$$

20 L'équation E42 est une généralisation des équations E24 et E25.

On peut aussi obtenir explicitement  $\beta_1$  de la manière décrite ci-dessous.

L'équation E19ter s'écrit:

$$Az^2 + z + C = 0 \quad (\text{E19qua})$$

avec

$$25 \quad C = \frac{\sigma_{01}}{\sigma_{12}(1 + \pi_{01})} \text{ et } A = \pi_{12}C$$

S'il existe une solution de module 1, elle vérifie:

$$Az + 1 + Cz^* = 0$$

Où  $z^*$  désignant le complexe conjugué de  $z$ .

30 On en tire:

$$\left(\frac{A+C}{2}\right)(z + z^*) + \left(\frac{A-C}{2}\right)(z - z^*) = 1$$

et finalement:

$$\cos 4\beta_1 = \frac{1 - |C|^2 (1 + |\pi_{12}|^2)}{|C|^2 (\pi_{12} + \pi_{12}^*)}$$

qui généralise les expressions E22 et E23 et donne l'épaisseur du revêtement idéal.

#### VI.2-2) supports AR-X-Pol-1 approchés.

5 Lorsque les trois indices sont imposés ou contraints et que l'un d'entre eux au moins est complexe, le minimum de  $|\sigma|$  par rapport à  $e_1$  n'est plus nul si la condition E42 n'est pas vérifiée par la solution de plus petit module de l'équation E19ter, mais il existe néanmoins puisque  $|\sigma|$  est une fonction quasi-périodique de  $e_1$ . On entend ici par "quasi-périodique" que  $n_1$  étant complexe,  $e^{-4j\beta_1}$  s'amortit quand  $e_1$  augmente, ce qui correspond au meilleur coefficient d'extinction possible compte tenu des contraintes.

10 15 Le meilleur coefficient d'extinction possible est obtenu en recherchant le minimum de  $|\sigma|$  (ou de façon équivalente celui de  $|\sigma|^2$ ) par rapport à  $e_1$ . A  $\theta_1$  et  $n_1$  fixés, cela revient à le chercher par rapport à la quantité complexe  $\beta_1$ , ce qui peut être fait numériquement.

L'épaisseur  $e_1$  est ensuite donnée par l'équation:

$$e_1 = \frac{\lambda \beta_1}{2\pi |n_1 \cos \theta_1|} \quad (\text{E43})$$

qui est une généralisation de l'équation E18.

#### VI.2-3) revêtement diélectrique sur support absorbant.

Un cas particulier utile est celui où seul le support est absorbant, les indices des autres milieux restant réels. Alors  $\beta_1$  est réel, l'équation E43 se réduit à l'équation E18, et  $|\sigma|$  est une fonction périodique de  $\beta_1$ .

20 25 Mais comme  $\sigma_{12}$  et  $\pi_{12}$  sont complexes,  $e^{-2j\beta_1}$  n'est plus réel. L'épaisseur optimale est donc donnée par:

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = e_c + k \frac{\lambda}{2} \quad (\text{E44})$$

où la plus petite des solutions  $e_c$  n'est plus égale ni à  $\frac{\lambda}{4}$  ni à  $\frac{\lambda}{2}$ .

Cette équation généralise les équations E24 et E25.

Ainsi, dans le cas d'un substrat 1 absorbant, le revêtement AR-X-POL se différencie d'un revêtement anti-réfléchissant classique non seulement par son indice, mais aussi par son épaisseur.

### VII Supports amplificateurs de contraste idéaux

5 Pour la visualisation du bord d'un objet d'étude ayant la forme d'un film mince posé sur la surface du support, il convient d'exploiter d'une part la différence entre les intensités recueillies en observant le film et d'autre part la surface du substrat 1 nue qui sont notées  $I_F$  et  $I_S$  (ou de façon équivalente  $I(F)$  et  $I(S)$ ). Ces intensités sont proportionnelles aux intensités normalisées 10 correspondantes.

Le contraste du bord du film est donné par la relation suivante:

$$C_F = \frac{I_F - I_S}{I_F + I_S} \quad (E50)$$

$I_F$  et  $I_S$  étant positifs,  $C_F$  est une fonction strictement croissante du rapport  $\frac{I_F}{I_S}$ .

15 Pour bien visualiser le film, il faut maximiser  $|C_F|$  et donc rendre le rapport  $\frac{I_F}{I_S}$  maximal ( $I_S \rightarrow 0$ , pour tendre vers un contraste de 1) ou minimal ( $I_F \rightarrow 0$ , pour tendre vers un contraste de -1). Il faut donc éteindre soit la surface, soit le film.

Une méthode de visualisation sensible repose d'une part sur une bonne extinction, et d'autre part sur une extinction critique, c'est à dire très sensible à 20 l'épaisseur de la dernière couche 2 de l'empilement. Les supports anti-réfléchissants AR-X-Pol présentent ces qualités et sont donc également des supports amplificateurs de contraste.

Les performances d'une méthode de visualisation peuvent être quantifiées par le contraste obtenu lorsque le film observé devient extrêmement mince. Dans ce cas,  $I_F$  et  $I_S$  deviennent voisins et  $dI = I_F - I_S$  s'apparente à un élément différentiel.

Pour un film d'épaisseur très mince  $\Delta e$  posé sur le support, on peut écrire au premier ordre en  $\Delta e$ :

$$\frac{I_F}{I_S} = 1 + \frac{1}{I_S} \frac{dI}{de} \quad \Delta e \approx 1 + \Delta e \frac{d}{de} \ln I \quad (E51)$$

30 où on a supposé que l'indice optique du film est identique à celui de la couche 2 supérieure, c'est à dire de la dernière couche 2 de l'empilement, et où  $\frac{dI}{de}$  est

la dérivée de l'intensité réfléchie par le substrat 1 nu par rapport à l'épaisseur  $e$  de cette couche 2.

5 Dans le cas où le substrat 1 est composé d'un support solide recouvert d'une seule couche 2 diélectrique,  $e$  est donc l'épaisseur de la couche 2 unique. Le film apparaît donc comme une simple fluctuation d'épaisseur de la couche 2 supérieure.

Un contraste optimal est donc obtenu pour les deux situations:

- i)  $\frac{d}{de} \ln I \rightarrow +\infty$  (extinction du support,  $C_f = +1$ )
- ii)  $\frac{d}{de} \ln I = -1$  ( extinction du film,  $C_f = -1$ )

10 Le contraste optimal ne peut être atteint qu'avec une extinction totale.

La sensibilité de la visualisation est, en  $\text{Angströms}^{-1}$ :

$$\frac{C_f}{\Delta e} = \frac{1}{2} \frac{d \ln I}{de} \quad (\text{E52})$$

Elle n'a de sens que lorsque le contraste est faible ( quand  $\frac{d \ln I}{de}$   $\Delta e$  est très petit devant 1) et permet de comparer des seuils de détection.

15 **VII.1) en lumière non polarisée**

Dans l'équation E51,  $\frac{I_F}{I_S} = \frac{R_{NP}(F)}{R_{NP}(S)} \approx 1 + \Delta e \frac{d}{de} \ln R_{NP}$ .

20 Puisque l'extinction totale n'est possible qu'avec un support anti-réfléchissant parfait et puisque ce support n'existe que pour une incidence normale, les performances de ce support pour la visualisation en lumière convergente, c'est à dire pour l'imagerie, sont limitées.

**VII.2) entre polariseur et analyseur croisés**

L'équation E51 devient

$$\frac{R_F(\phi)}{R_S(\phi)} \approx 1 + \Delta e \frac{d}{de} \ln |\sigma|^2 \quad (\text{E52})$$

25 Un contraste optimal est donc obtenu pour les deux situations:

- i)  $\frac{d}{de} \ln |\sigma|^2 \rightarrow +\infty$  (extinction du support,  $C_f = +1$ )
- ii)  $\frac{d}{de} \ln |\sigma|^2 = -1$  ( extinction du film,  $C_f = -1$ )

Chacune de ces situations correspond à  $\sigma = 0$  c'est à dire à un support AR-X-Pol idéal. Dans la première, l'épaisseur optimale  $e$  est celle du

revêtement seul. Dans la seconde, c'est la somme des épaisseurs du revêtement et de l'objet.

La sensibilité de la visualisation est donnée par, en [Angströms<sup>-1</sup>] :

5

$$\frac{C_F}{\Delta e} = \frac{d}{de} \ln |r_p + r_s|$$

Il résulte des considérations précédentes que

- 1) Les meilleurs supports amplificateurs de contraste sont les supports anti-réfléchissants idéaux.
- 10 2) Les supports AR-X-Pol sont les seuls supports capables de fournir une extinction totale en éclairage annulaire et une extinction quasi-parfaite en éclairage faiblement convergent. L'utilisation de ces supports entre polariseurs croisés permet d'obtenir des contrastes nettement meilleurs que tous les autres supports dans tous les modes d'imagerie sans marquage en lumière incohérente.
- 15

### VIII. supports amplificateurs de contraste non idéaux en lumière polarisée:

#### VIII.1) entre polariseurs croisés

Lorsque le support n'est plus idéal, l'équation E19 bis n'est plus satisfaite.

- 20 C'est en particulier le cas quand l'indice de la couche 2 est imposé et qu'elle n'a plus de solution parce que la relation E26 n'est plus vérifiée. Alors, l'extinction totale n'est plus possible et la condition  $C_f = +1$  ne peut plus être atteinte (la condition  $C_f = -1$  peut encore l'être pour un objet très particulier). Nous montrons que le contraste n'est plus optimisé lorsque le minimum de
- 25 l'intensité réfléchie est atteint mais pour des épaisseurs de couche 2 situées de part et d'autre de ce minimum, le minimum correspondant à l'inversion de signe du contraste.

Dans ce cas le contraste est optimisé quand:

- i)  $\frac{d}{de} \ln |\sigma|^2$  maximum (extinction partielle du support,  $C_f$  maximum)
- 30 ii)  $\frac{d}{de} \ln |\sigma|^2$  minimum (extinction partielle du film,  $C_f$  minimum)

C'est à dire quand :

$$\frac{d^2}{de^2} \ln |\sigma|^2 = 0 \quad (E57)$$

Nous nous limitons maintenant au cas de matériaux diélectriques et nous cherchons l'épaisseur optimale de la couche 2 diélectrique pour l'optimisation du contraste avec un revêtement amplificateur à une couche 2.

5 L'épaisseur d'inversion de contraste  $e_1$  est donnée par l'équation E24 qui correspond à la condition que  $e^{-2j\beta_1}$  soit réel. Afin d'explorer les épaisseurs situées de part et d'autre de  $e_1$ , nous posons  $\beta_1 = \frac{\pi}{2} + \epsilon$ .

La relation E26 n'étant plus complètement vérifiée, nous posons :

$$\Delta = \frac{\sigma_{12}(1+\pi_{01}) - \sigma_{01}(1+\pi_{12})}{\sigma_{01}} \quad (\text{E58})$$

Le développement en  $\epsilon$  de  $|\sigma|^2$  donne :

$$10 \quad |\sigma|^2 = \sigma_{01}^2 \left( \frac{A + 4B\epsilon^2}{C + 4D\epsilon^2} \right) \quad (\text{E59})$$

expression dans laquelle:

$$A = \Delta^2 \quad (\text{E60})$$

$$B = (1 - \pi_{12})^2 + \Delta(1 + \pi_{12}) \quad C = (1 - P + \pi_{01}\pi_{12}) \quad D = P + P\pi_{01}\pi_{12} - 4\pi_{01}\pi_{12}$$

15

et où :

$$P = r_{01(p)}r_{12(p)} + r_{01(s)}r_{12(s)} \quad (\text{E61})$$

20

Il s'ensuit:

$$\frac{d}{d\epsilon} \ln |\sigma|^2 = \frac{8B\epsilon}{A + B\epsilon^2} - \frac{8D\epsilon}{C + D\epsilon^2} \quad (\text{E61})$$

L'équation E57 a pour solution:

25

$$4\epsilon^2 = \frac{AC}{BC + AD} \quad (\text{E62})$$

Si le revêtement reste performant,  $\Delta$  est petit, et dans ce cas  $\epsilon$  est proche de  $\frac{\Delta}{2}$ .

La relation de définition E18 nous donne finalement les deux épaisseurs  $e_1'$  et  $e_1''$  qui optimisent le contraste:

$$e_1' = \frac{\lambda}{4} \left( 1 + \frac{2\epsilon}{\pi} \right) + k \frac{\lambda}{2} \quad (E63)$$

$$e_1'' = \frac{\lambda}{4} \left( 1 - \frac{2\epsilon}{\pi} \right) + k \frac{\lambda}{2}$$

5

Les formules E63 généralisent la formule E24 aux supports amplificateurs de contraste non idéaux.

Nous désignons la famille des supports amplificateurs de contraste par 10 l'appellation supports Ampli-Pol lorsqu'il y a lieu de les distinguer des supports AR-Pol. Entre polariseurs croisés, ils deviennent les supports Ampli-X-Pol, etc..

#### IX. Supports AR-X-Pol et Ampli-X-Pol anisotropes

Dans toute utilisation d'un support AR-Pol ou d'un support Ampli-Pol, il est essentiel d'optimiser ses performances (taux d'extinction utile  $C_u$  ou contraste 15  $C_f$ ). Pour cela, il faut satisfaire aux relations qui le définissent avec précision, ce qui engendre des difficultés de fabrication (tolérance sévère sur l'épaisseur  $e$  par exemple) et des difficultés de mise en oeuvre (réglage des paramètres du microscope pour une visualisation par exemple).

Afin de diminuer ces difficultés, il est avantageux d'introduire dans les 20 supports un élément de réglage. Cet élément est apporté par l'utilisation de matériaux aux propriétés optiques anisotropes dans la réalisation des supports. Par défaut, le matériau anisotrope est le substrat 1, la couche 2 et le milieu incident restant isotropes. Les axes principaux ( $x$ ,  $y$ , et  $z$ ) du matériau anisotrope sont parallèles et perpendiculaire à la surface du support. Les 25 coefficients de Fresnel du support sont remplacés par une matrice de réflexion:

$$\begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \quad (E70)$$

dans laquelle compte tenu des orientations des axes principaux  $r_{ps} = r_{sp} = 0$ , ce 30 qui permet d'exprimer l'amplitude réfléchie en fonction de l'amplitude incidente comme:

$$\begin{pmatrix} E_{r_p} \\ E_{r_s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{px} & 0 \\ 0 & r_{sx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{pmatrix} \quad (E71)$$

quand l'axe x est dans le plan d'incidence, et comme:

$$\begin{pmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{py} & 0 \\ 0 & r_{sy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{pmatrix} \quad (E71)$$

5 quand l'axe y est le plan d'incidence.

A l'interface entre le milieu isotrope i et le milieu anisotrope j, les coefficients  $r_{ij(px)}$ ,  $r_{ij(sx)}$ ,  $r_{ij(py)}$  et  $r_{ij(sy)}$  sont donnés par

$$r_{ij(px)} = \frac{n_{jx}n_{jz}c_i - n_i(n_{jz}^2 - n_i^2s_i^2)^{\frac{1}{2}}}{n_{jx}n_{jz}c_i + n_i(n_{jz}^2 - n_i^2s_i^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (E72)$$

$$r_{ij(sx)} = \frac{n_i c_i - (n_{jy}^2 - n_i^2s_i^2)^{\frac{1}{2}}}{n_i c_i + (n_{jy}^2 - n_i^2s_i^2)^{\frac{1}{2}}}$$

10

si le plan d'incidence est parallèle à x, et:

$$r_{ij(py)} = \frac{n_{jy}n_{jz}c_i - n_i(n_{jz}^2 - n_i^2s_i^2)^{\frac{1}{2}}}{n_{jy}n_{jz}c_i + n_i(n_{jz}^2 - n_i^2s_i^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (E73)$$

$$r_{ij(sy)} = \frac{n_i c_i - (n_{jx}^2 - n_i^2s_i^2)^{\frac{1}{2}}}{n_i c_i + (n_{jx}^2 - n_i^2s_i^2)^{\frac{1}{2}}}$$

15 La formule E17 restant toujours valide pour  $r(mx)$  et  $r(my)$  à la fois s'il est parallèle à y.

Les équations E72 montrent que, selon l'orientation relative  $\varphi = (P, x)$  de l'échantillon et du polariseur  $P$  en azimut, obtenue en effectuant une rotation de l'un par rapport à l'autre autour de la normale, on obtient des coefficients de Fresnel effectifs  $r_{ij(p)}$  et  $r_{ij(s)}$  variables, donnés par les combinaisons linéaires suivantes:

$$r_{ij(p)} = r_{ij(px)} \cos \varphi + r_{ij(py)} \sin \varphi \quad (E74)$$

$$r_{ij(s)} = r_{ij(sx)} \cos \varphi + r_{ij(sy)} \sin \varphi$$

25 Un raisonnement analogue s'applique au cas où le substrat 1 est isotrope et la couche 2 anisotrope.

Ainsi, un support optimal pour une visualisation sous microscope en lumière polarisée est anisotrope et tel que tel que la valeur optimale de ses

coefficients de réflexion  $r_p$  et  $r_s$  soit obtenue pour un angle  $\varphi$  intermédiaire entre 0 et  $\frac{\pi}{2}$  et de préférence égal à  $\frac{\pi}{4}$  pour donner la latitude de réglage maximale.

## X. Polarisation circulaire

5 L'invention ne saurait être limitée à la description qui précède. Le faisceau lumineux utilisé a ainsi dans un autre mode de réalisation une polarisation circulaire et les supports AR-Pol et Ampli-Pol présentent avantageusement une même efficacité. Comme il est bien connu, les observations et mesures entre polariseur et analyseur croisés sont alors remplacées par des observations et 10 mesures équivalentes entre [polariseur suivi d'une lame  $\frac{1}{4}$  d'onde] et [lame  $\frac{1}{4}$  d'onde identique suivie d'un polariseur (ou analyseur) parallèle au premier, préférentiellement identique]. Ceci vaut aussi pour toutes les techniques de visualisation et de mesure en contraste interférentiel différentiel (DIC).

15 Le support de l'invention a fait l'objet de plusieurs mises en œuvre présentées dans les exemples suivants :

### Exemple 1

20 Les supports AR-Pol, bien qu'obéissant à des règles de construction très pointues, se déclinent à l'infini. Quatre exemples (indice  $n_1$  et épaisseur de couche  $e_1(\text{Å})$ ) de supports AR-Pol-1 idéaux pour une incidence proche de la normale ( $\theta_0=0$ ) sont présentés ci dessous. Ces exemples sont destinés à être utilisés comme supports porte-objet pour des observations et des mesures 25 effectuées dans un milieu ambiant tel que l'air (le milieu incident étant l'air ou le substrat) et pour une longueur d'onde arbitraire d'éclairage  $\lambda = 589.3 \text{ nm}$ .

Nous donnons aussi pour ces substrats 1 les indices et les épaisseurs des revêtements à une couche 2 qui optimisent à la fois le contraste de toute visualisation ou mesure entre polariseurs croisés pour un éclairage convergent 30 d'ouverture 30 degrés et nous donnons les contrastes obtenus dans ces conditions au bord d'un film d'1 nanomètre d'épaisseur. Les épaisseurs  $e_1'$  et  $e_1''$  sont celles données par les équations E63.

		$\theta_0=0$	$\theta_0=0$	$C_f$	$0 < \theta_0 < \frac{\pi}{6}$	$0 < \theta_0 < \frac{\pi}{6}$	$0 < \theta_0 < \frac{\pi}{6}$	$C_f$
substrat	$N_2$	$n_1$	$e_1(\text{\AA})$		$n_1$	$e_1'(\text{\AA})$	$e_1''(\text{\AA})$	
Or	$0.47 - 2.83j$	1.65	800	1	1.58	870	880	0.17
Argent	$0.2 - 3.44j$	1.60	850	1	1.53	930	940	0.17
aluminium	$1.44 + 5.23j$	1.50	953	1	1.44	1 040	1 050	0.07
Nickel	$1.58 - 3.42j$	1.52	920	1	1.46	1 000	1 010	0.06

Les indices  $n_1$  sont très courants et les couches 2 peuvent être réalisées par toutes les techniques de dépôt classiques, par exemple par PECVD (Phase evaporation chemical vapor deposition).

5

### Exemple 2

Des exemples (indice  $n_1$ ) de supports AR-Pol-1 sont présentés ci-dessous pour un substrat 1 de silicium et pour des utilisations soit dans un milieu ambiant tel que l'air, soit en immersion.

Des supports AR-Pol idéaux anisotropes peuvent être obtenus en déposant sur un substrat 1 de silicium ( $n_2 = 3.88 - 0.02j$ ) dopé ou non, clivé selon un plan 100 une couche 2 d'épaisseur optique  $\frac{\lambda}{4}$  au sens de la relation

E24 et d'indice  $n_1$ :

15 1.35 quand le milieu incident est l'air (d'indice 1)  
 1.75 quand le milieu incident est l'eau (d'indice 1.33)  
 1.95 quand le milieu incident est un huile d'indice 1.5.

Les couches 2 ont alors des indices moins courants qui s'obtiennent préférentiellement:

20 - soit par des procédés sol-gel et aérogels conduisant à des silices poreuses (indice 1.35)  
 - soit par des techniques d'oxydation avec des mélanges de gaz conduisant à des mélanges de matériaux  $SiO_2 - SiO$  (indice 1.75), ou à des couches d'oxynitrides  $SiO_xN_y$  (indices 1.75 et 1.95) avec les proportions suivantes:  $x=0.5$  et  $y=0.9$  pour obtenir  $n_1 = 1.75$ ;  $x=0.05$  et  $y=0.95$  pour obtenir  $n_1 = 1.95$

L' indice  $n_1 = 1.35$  peut aussi s'obtenir par dépôt de polymères fluorés (tels que des trifluoroalkyl-alkylsiloxyanes ou des copolymères de trifluoroalkyl-

alkylsiloxanes et de dimethylsiloxanes), le dépôt pouvant s'effectuer par spin-coating à partir d'une solution.

Les indices 1.75 et 1.95 peuvent aussi s'obtenir par toutes les techniques de dépôt, en particulier par dépôt PECVD de mélanges d'oxydes tels que  $HfO_2$ , et  $Y_2O_3$  ou de tous les matériaux listés dans les dictionnaires de propriétés physiques des matériaux (par exemple: *Handbook of Optical constants of solids*, Vol. 5, Academic Press, Ed. Palik and Ghosh (1997) ) ou dans les dictionnaires d'optique (par exemple: *Handbook of optics*, McGraw-Hill Professional Publishing, New-York, (2000))

5 L'indice de certains matériaux change fortement avec la longueur d'onde de la lumière, et l'ajustement d'indice peut être remplacé par un ajustement de longueur d'onde; C'est par exemple le cas d'une couche 2 de  $SiO$  qui présente un indice utile de 1.95 pour  $\lambda = 490$  nm.

10

### 15 Exemple 3

Nous donnons ci-dessous quelques autres exemples de supports AR-Pol idéaux (qui sont donc aussi Ampli-Pol idéaux) pour différents milieux incidents et pour un éclairage annulaire de très faible incidence ( $\theta_0 = 0.2$  degrés).

20 L'épaisseur  $e_1$  est en Angströms.

substrat	$n_2$	$n_0$	$n_1$	$e_1$
or	0.47-2.83j	1.33	2.42	490
or	1.5		2.95	368
argent	2.0-3.44j	1.33	2.35	526
argent		1.5	2.8	417
aluminium	1.44+5.23j	1.33	2.05	684
aluminium		1.5	2.33	587
nickel	1.58-3.42j	1.33	2.13	620
nickel		1.5	2.5	505
cadmium	1.13-5.01j	1	1.47	968
cadmium		1.33	2.08	667
cadmium		1.5	2.38	575
tin	1.43-5.25j	1	1.48	975
tin	1.48-5.25j	1	1.48	975

		1.33	2.03	693
		1.5	2.34	600
cuivre	0.52-2.57j	1	1.68	768
cuivre		1.33	2.52	448
cuivre		1.5	3.05	338
Fer (évaporé)	1.51-1.63j	1	1.545	802
		1.33	2.24	459
		1.5	2.72	332

#### Exemple 4

5 Nous donnons enfin un exemple avec un éclairage annulaire et un angle d'incidence important. Pour un support de cadmium et une observation dans un milieu ambiant tel que l'air sous un angle d'incidence unique de 30 degrés, la couche 2 idéale est obtenue pour  $n_1 = 1.48$  et  $e_1 = 962$  Angströms.

10 Les valeurs des indices sont tirées de livre de Born and Wolf, intitulé "Principles of Optics : Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and diffraction of Light", Cambridge University Press (1999).

15 Applications possibles dans les industries de l'optique, dans l'amélioration des mesures ou l'observation en réflexion de films minces ou d'objets très petits sous microscope optique ou sous tout autre instrument d'imagerie optique tel que viseur, lunette, microscope, loupe, loupe binoculaire, caméra, appareil photo, microscope à champ proche, endoscope, microscope confocal, microscope à champ proche optique (SNOM), lecteur de biopuces, lecteur magnéto-optique, microscope confocal.

20 Les supports AR-X-Pol et Ampli-Pol sont utilisables à la fois comme fond anti-réfléchissant et comme support porte objet pour tous les travaux de microscopie en lumière polarisée en réflexion, que l'observation se fasse à l'air libre, en immersion, ou à travers le support.

25 Ils permettent une visualisation optimale non seulement d'objets posés à la surface du support, mais aussi de l'interface entre le substrat 1 et la couche 2.

Ils permettent une visualisation et une mesure optimales de tous les effets de dichroisme et de biréfringence à l'intérieur de la couche 2 elle-même.

Cela est particulièrement avantageux pour l'imagerie et la lecture parallèle de domaines magnétiques situés dans la couche lorsqu'elle possède une

5 susceptibilité magnéto-optique à chacun des effets suivants: effet Faraday, effet Voigt, biréfringence magnétique linéaire.

Ils permettent une visualisation et une mesure optimales de tous les effets d'anisotropie de réflexion à l'interface entre le substrat 1 et la couche 2, ce qui est particulièrement avantageux pour la mise en oeuvre de la technique de

10 microscopie de réflexion anisotrope (RAM).

Cela est aussi particulièrement avantageux si le substrat 1 présente une susceptibilité magnéto-optique (effet Kerr longitudinal ou transverse, effet Kerr polaire), les revêtements AR-Pol apportant une amélioration considérable en contraste et en sensibilité des procédés de lecture magnéto-optiques.

15 Les supports AR-Pol sont particulièrement efficaces pour les observations en contraste interférentiel différentiel en réflexion, quel que soit la variante de la technique utilisée, et quel que soit le type de polarisation utilisé (linéaire ou circulaire) et permettent la combinaison de toutes ces techniques de contraste interférentiel avec toutes les autres techniques de visualisation, de détection,

20 ou de mesure mentionnées.

Les revêtements AR-Pol à une couche 2 existent pour tous les types de substrats 1. Ils permettent une détection plus sensible qu'avec toutes les autres techniques des modifications qui se produisent à l'extrémité d'une fibre optique, et notamment la détection d'une espèce capturée par une couche 2 sensible 25 installée à l'extrémité d'une telle fibre.

Ce sont des supports porte-objet idéaux pour les techniques de microscopie à champ proche (AFM, STM, SNOM, et autres SPM) car ils permettent la détection, le repérage, et la visualisation de films ou objets invisibles par les techniques optiques conventionnelles.

30 Ce sont aussi des supports idéaux pour effectuer le suivi optique in situ ou le contrôle de la qualité a posteriori de dépôts de couches 2 ultra-minces effectués par toutes les techniques de dépôt disponibles, par exemple par les techniques de Langmuir-Blodgett, par les techniques de plasmas, de dépôt ionique, de spin-coating, de dip-coating, par MBE, etc...

Utilisés comme supports porte-objets, ils augmentent aussi l'efficacité des techniques des techniques magnéto-optiques, des techniques de microscopie confocale en lumière polarisée, des techniques SNOM (Scanning Near-field Optical Microscopy) en lumière polarisée, et de toutes les techniques de visualisation spectroscopiques (absorption infra-rouge, Raman, Fluorescence, Absorption ultra-violette, Microscopie à 2 photons).

Utilisés comme supports porte-objets, ils permettent d'accroître considérablement la qualité des mesures de réflectivité en lumière polarisée et d'ellipsométrie sous microscope optique.

Les supports AR-Pol sont aussi avantageusement utilisés comme supports porte-objet dans tous les dispositifs de micro-manipulation sous microscope optique: pinces optiques, pinces magnétiques, pinces piezo-électriques.

REVENDICATIONS

1. Support destiné à l'observation entre polariseurs croisés d'un objet placé à son voisinage dans un milieu (3) d'indice  $n_0$  avec un éclairage incohérent convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une longueur d'onde  $\lambda$ , comportant

5     - un substrat (1) d'indice de réfraction complexe  $n_2$ ,

   - une couche (2) d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$  caractérisé en ce que,

10

$$\frac{d^2}{de_1^2} \ln |\sigma|^2 = 0$$

avec

$$\sigma = r_p + r_s = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e(-2j\beta_1) + \sigma_{01}\pi_{12}e(-4j\beta_1)}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)}e(-2j\beta_1))(1 + r_{01(s)}r_{12(s)}e(-2j\beta_1))}$$

15

formule dans laquelle  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel :

$$r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}$$

20

et

$$r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

25     et  $\beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda}$  avec  $\cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}$ .

2. Support destiné à l'observation entre polariseurs croisés d'un objet placé à son voisinage dans un milieu d'indice  $n_0$  avec un éclairage incohérent convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une longueur d'onde  $\lambda$  comportant

30     - un substrat (1) d'indice de réfraction complexe  $n_2$ ,

   - une couche (2) d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$

caractérisé en ce que,

$$\frac{d}{de_1} |\sigma^2| = 0$$

5 avec

$$\sigma = r_p + r_s = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e(-2j\beta_1) + \sigma_{01}\pi_{12}e(-4j\beta_1)}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)}e(-2j\beta_1))(1 + r_{01(s)} + r_{12(s)}e(-2j\beta_1))}$$

formule dans laquelle  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel :

10

$$r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}$$

et

15

$$r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

$$\text{et } \beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda} \text{ avec } \cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}.$$

3. Support destiné à l'observation entre polariseurs croisés d'un objet placé à son voisinage dans un milieu d'indice  $n_0$  avec un éclairage incohérent 20 convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une longueur d'onde  $\lambda$ , comportant

- un substrat (1) d'indice de réfraction complexe  $n_2$ ,
- une couche (2) d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$

caractérisé en ce que,

25

$$\frac{d}{de_1} \left( \frac{|\sigma|^2}{R_{NP}} \right) = 0$$

avec

$$R_{NP} = \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2 + \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2$$

et

$$r(p) = \frac{r_{01(p)} + r_{12(p)} e(-2j\beta_1)}{1 + r_{01(p)} r_{12(p)} e(-2j\beta_1)} \quad \text{et} \quad r(s) = \frac{r_{01(s)} + r_{12(s)} e(-2j\beta_1)}{1 + r_{01(s)} r_{12(s)} e(-2j\beta_1)}$$

et

$$5 \quad \sigma = r_p + r_s = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e(-2j\beta_1) + \sigma_{01}\pi_{12}e(-4j\beta_1)}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)} e(-2j\beta_1))(1 + r_{01(s)} r_{12(s)} e(-2j\beta_1))}$$

formule dans laquelle  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel :

$$10 \quad r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}$$

et

$$r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

15

$$\text{et } \beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda} \text{ avec } \cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}.$$

4. Support selon la revendication 1 ou 2 ou 3, caractérisé en ce que l'indice de réfraction  $n_1$  et l'épaisseur  $e_1$  de la couche (2) sont tels que  $\sigma = 0$ .

20 5. Support selon la revendication 4, caractérisé en ce que le substrat (1) et la couche (2) sont diélectriques ou faiblement absorbant, les conditions générales de la revendication 4 se réduisant à

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = \frac{\lambda}{4} + k \frac{\lambda}{2}$$

25 et

$$n_1^2 = \frac{n_2^2 + \sqrt{n_2^2 \cos^2 \theta_0 (n_2^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0)}}{n_2^2 + n_0^2 \cos^2 \theta_0}$$

avec  $k$  entier.

6. Support selon la revendication 5, caractérisé en ce que  $\theta_0$  est inférieur à  $2^\circ$ , les conditions générales de la revendication 4 se réduisant à

$$\frac{2}{n_1^2} = \frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_2^2}$$

5 et

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = \frac{1}{4} + k \frac{1}{2}$$

avec  $k$  entier.

10 7. Support selon la revendication 4, caractérisé en ce que le substrat (1) est en cadmium avec  $n_2 = 1.13 - 5.01j$ , la couche (2) ayant pour indice  $n_1 = 1.48$  et  $e_1 = 962 \text{ \AA}$  pour l'air comme milieu ambiant (3) et  $\theta_0 = 30^\circ$ .

8. Support selon la revendication 4, caractérisé en ce que le substrat (1) et la (2) ont les spécificités du tableau suivant dans lequel  $n_1$  et  $e_1$  sont l'indice et l'épaisseur de la couche,  $n_2$  l'indice de réfraction complexe du substrat (1), pour l'air comme milieu ambiant (3) et  $\theta_0 = 0,2^\circ$

substrat	$n_2$	$n_1$	$e_1(\text{\AA})$
or	$0.47 - 2.83j$	1.65	800
argent	$0.2 - 3.44j$	1.60	850
aluminium	$1.44 + 5.23j$	1.50	953
nickel	$1.58 - 3.42j$	1.52	920

15 9. Support selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que  $\theta_0$  est un angle d'incidence moyen valant  $20^\circ$  et en ce que le substrat (1) et la couche (2) ont les spécificités du tableau suivant dans lequel  $n_1$  et  $e_1$  sont l'indice et l'épaisseur de la couche (2),  $n_2$  l'indice de réfraction complexe du substrat (1), pour l'air comme milieu ambiant (3)

20

substrat	$n_2$	$n_1$	$e_1 (\text{\AA})$
or	$0.47 - 2.83j$	1.58	870
argent	$0.2 - 3.44j$	1.53	930
aluminium	$1.44 + 5.23j$	1.44	1 040
nickel	$1.58 - 3.42j$	1.46	1 000

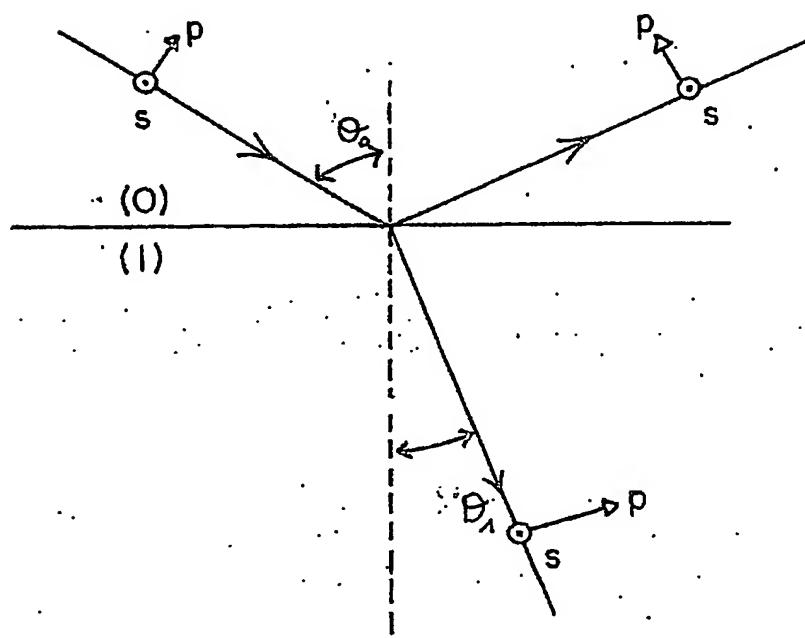


FIGURE 1

1/2

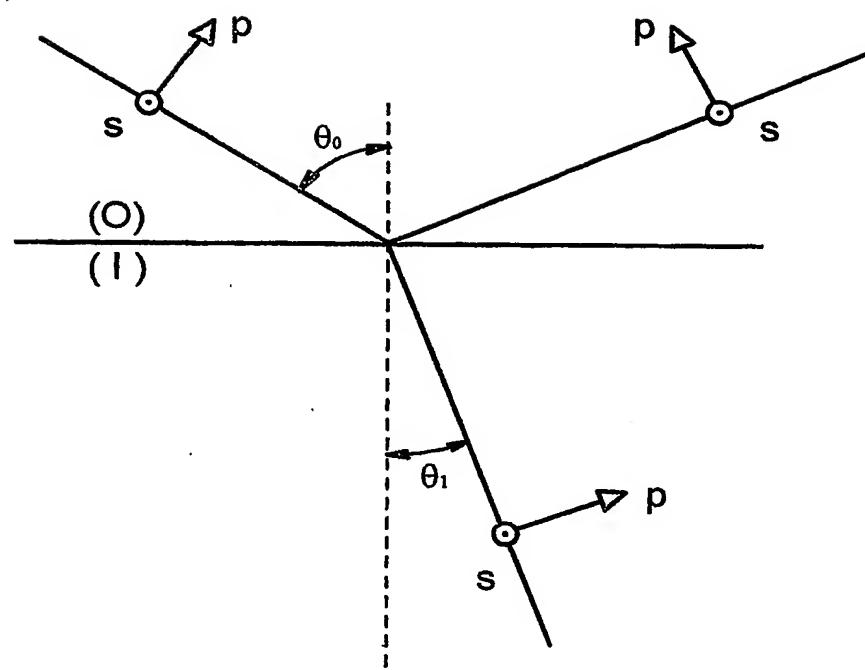


FIGURE 1

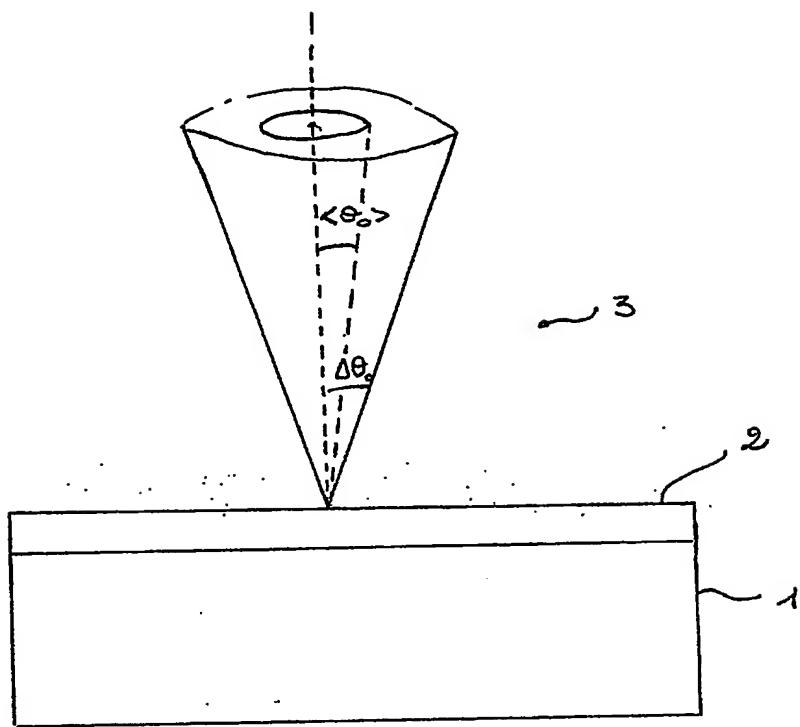
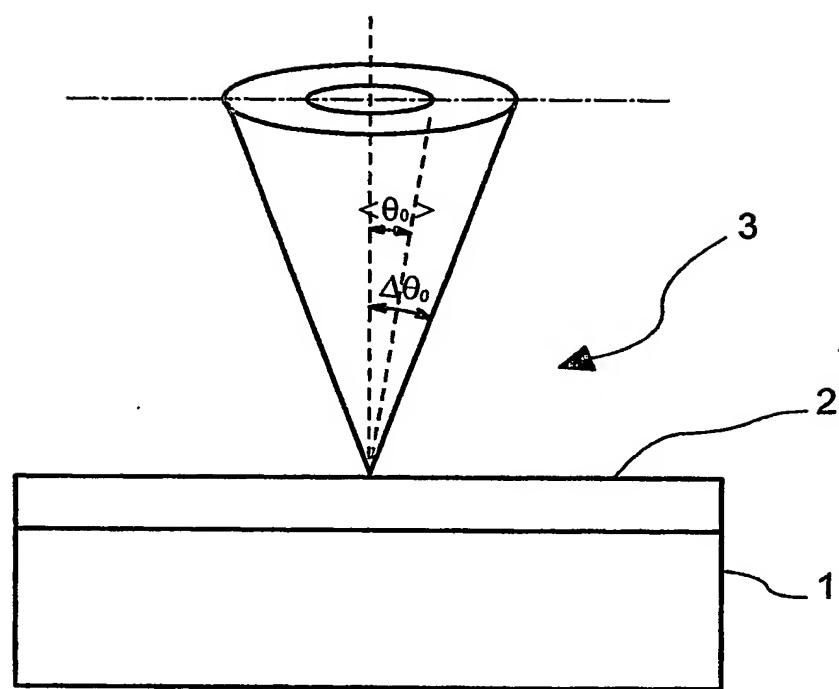


FIGURE 2

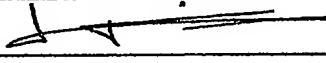


**FIGURE 2**

# BREVET DINVENTION

## Désignation de l'inventeur

Vos références pour ce dossier	P173FR
N°D'ENREGISTREMENT NATIONAL	0207599
TITRE DE L'INVENTION	
SUPPORTS ANTI-REFLECHISSANTS ET SUPPORTS AMPLIFICATEURS DE CONTRASTE POUR LA LUMIERE POLARISEE EN REFLEXION	
LE(S) DEMANDEUR(S) OU LE(S) MANDATAIRE(S):	

DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S):	
Inventeur 1	
Nom	AUSSERE
Prénoms	Dominique
Rue	Les Ardriers
Code postal et ville	72370 SOULITRE
Société d'appartenance	
Inventeur 2	
Nom	VALIGNAT
Prénoms	Marie-Pierre
Rue	246 Valley Road
Code postal et ville	New Jersey 08540 PRINCETON - USA
Société d'appartenance	
DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE	

La loi n°78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique aux fichiers et aux libertés s'applique aux réponses faites à ce formulaire. Elle garantit un droit d'accès et de rectification pour les données vous concernant auprès de l'INPI.

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER: \_\_\_\_\_**

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**